

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 666.97

DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2

Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов

Танг Ван Лам¹, Нго Суан Хунг², Ву Ким Зиен², Б.И. Булгаков², С.И. Баженова²,
О.В. Александрова²

¹ Ханойский горно-геологический университет; г. Ханой, Вьетнам;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в качестве вяжущего вещества для получения бетонов применяется портландцемент, мировое производство которого формирует порядка 10 % общего выброса углекислого газа в атмосферу. Перспективна частичная или полная замена портландцемента новыми бесцементными вяжущими веществами, для получения которых могут быть использованы многотоннажные техногенные отходы, обладающие цементирующим действием, например, тонкоизмельченный доменный шлак (ДШ), зола уноса (ЗУ) ТЭС и зола, образующаяся при сжигании рисовой шелухи (ЗРШ). В качестве активатора схватывания и твердения таких вяжущих выступают водные щелочные растворы (NaOH и Na₂SiO₃ или KOH и K₂SiO₃), а для регулировки сроков схватывания — двуводный гипс. Бетон, получаемый на основе новых бесцементных вяжущих, называется геополимерный бетон.

Материалы и методы. С целью снижения расхода воды затворения при сохранении требуемой удобоукладываемости мелкозернистой бетонной смеси в ее состав вводился поликарбоксилатный суперпластификатор. Все сырьевые компоненты за исключением суперпластификатора местного для Вьетнама происхождения. Применялись следующие методы исследований: состав геополимерной бетонной смеси рассчитывали по методу абсолютных объемов, удобоукладываемость бетонной смеси определяли по ASTM C1611-18 и TCVN 3106:2007, прочность бетонов на сжатие и растяжение при изгибе — по ГОСТ 10180-2012, среднюю плотность бетона — по ГОСТ 12730.1-78.

Результаты. Разработан состав геополимерного бетона на щелочном бесцементном вяжущем, обладающий в результате тепловой обработки в течение шести часов при температуре 100 °С в возрасте 28 суток прочностью на сжатие порядка 60 МПа, который можно использовать в условиях жаркого и влажного климата Вьетнама.

Выводы. Разработанный бесцементный бетон также обладает высокой водонепроницаемостью и низким водопоглощением. Такой бетон экономичен, и его производство будет способствовать охране окружающей среды за счет экономии природных ресурсов и возможности использования многотоннажных техногенных отходов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геополимерный бетон, бесцементное щелочное вяжущее, многотоннажные техногенные отходы, активные минеральные добавки, активирующий щелочной раствор, поликарбоксилатный суперпластификатор

Благодарности. Публикуется при поддержке гранта научно-технической программы Министерства Вьетнама, реализуемой с 2021 года в соответствии с № 3813/QD-BGDĐT от 20.11.2020, № B2021-MDA-11 «Исследования по производству высокопрочного бетона с использованием нецементных вяжущих, используемых при строительстве зданий, подверженных воздействию коррозии морской водой».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен, Булгаков Б.И., Баженова С.И., Александрова О.В. Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. Вып. 2. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2

Geopolymer concrete made using large-tonnage technogenic waste

Tang Van Lam¹, Ngo Xuan Hung², Vu Kim Dien², Boris I. Bulgakov²,
Sofya I. Bazhenova², Olga V. Aleksandrova²

¹ Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, in all countries, Portland cement is used as a binder in the production of concrete, and its global production accounts for 10 % of the total carbon dioxide emitted into the atmosphere. Therefore, Portland cement can be

partially or fully replaced by new cement-free binders, made of large-tonnage technogenic waste with a cementing effect, for example, by finely ground blast furnace slag, fly ash generated by thermal power plants and ash formed during the combustion of rice hulls. Aqueous alkaline solutions (NaOH and Na_2SiO_3 or KOH and K_2SiO_3) should be used as activators of setting and hardening of such binders, and calcium sulfate dihydrate can be used to adjust the setting time. Concrete containing new cement-free binders is called geopolymer concrete.

Materials and methods. In order to reduce mixing water consumption and maintain the required workability of the fine-grained concrete mixture, a polycarboxylate superplasticizer was introduced into its composition. All raw materials, except for the superplasticizer, were of the Vietnamese origin. The following research methods were used: the composition of the geopolymer concrete mixture was analyzed using the absolute volume method, the workability of the concrete mixture was determined according to ASTM C1611-18 and TCVN 3106:2007, compressive and tensile strength of the concrete, subjected to bending, were tested pursuant to GOST 10180-2012, and the average density of concrete was tested according to GOST 12730.1-78.

Results. The co-authors have developed the composition of the geopolymer concrete containing the alkaline cement-free binder. As a result of the heat treatment of the 28-days-old concrete for 6 hours at 100°C , its compressive strength reaches about 60 MPa; hence, it can be used in the hot and humid climate of Vietnam.

Conclusions. This cement-free concrete, in addition to its high strength, has good water resistance and low water absorption. This concrete has economic benefits, and its production will help to protect the environment due to the lower consumption of natural resources and the applicability of large-tonnage technogenic waste.

KEYWORDS: geopolymer concrete, cement-free alkaline binder, large-tonnage technogenic waste, active mineral additives, activating alkaline solution, polycarboxylate superplasticizer

Acknowledgements. This work is published with the grant support provided by the research and technological programme of the Ministry of Vietnam, implemented as of 2021 pursuant to No. 3813/QĐ-BGDĐT 20.11.2020, No. B2021-MDA-11 "Research on production of high-strength concrete using cement-free binders in the course of construction of buildings exposed to marine corrosion".

FOR CITATION: Tang Van Lam, Ngo Xuan Hung, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I., Bazhenova S.I., Aleksandrova O.V. Geopolymer concrete made using large-tonnage technogenic waste. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2021; 11(2):2. URL: <http://ns-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы предложен новый способ получения бетонной смеси, не содержащей цемента, который может быть заменен многотоннажными отходами в виде топливной золы уноса (ЗУ), доменных шлаков (ДШ) и др. При этом по прочности бесцементный бетон, получаемый в результате затвердевания такой смеси, будет сравним с традиционным бетоном на основе цемента. Необходимым компонентом производства такого бетона является специальный щелочной раствор, «плавающий» промышленные отходы и скрепляющий между собой компоненты смеси так же, как и цемент. Такой материал будет обладать более высокой огне- и коррозионной стойкостью. Использование бетона без цемента может улучшить состояние окружающей среды, в том числе и за счет снижения выбросов в атмосферу углекислого газа, до 10 % которого в мире образуется в результате производства портландцемента [1–3].

Проблема улучшения экологии путем рационального применения многотоннажных промышленных отходов стоит весьма остро, поскольку на сегодняшний день в Российской Федерации одни лишь золошлаковые отходы предприятий энергетического комплекса, ежегодный объем которых превышает 25 млн т, занимают площадь более 20 тыс. га [4, 5].

Во Вьетнаме, согласно отчету Министерства промышленности и торговли, в настоящее время действует 21 угольная теплоэлектростанция, выбрасывающие почти 20 млн т золы и шлака в год, для чего требуются свалки общей площадью более 800 га. Ожидалось, что к 2020 г. будет функционировать еще 12 угольных электростанций, что грозит увеличени-

ем ежегодного выброса зол и шлаков до 23–25 млн т. Это отрицательно повлияет на окружающую среду и вызовет загрязнение воды. Хотя промышленные отходы (ЗУ, ДШ) и находят применение в производстве некоторых видов строительных материалов (например, обожженного кирпича, а также для выравнивания дорожного полотна), но их использование ограничено и составляет только около 5–10 млн т в год [6–8].

Во Вьетнаме действует значительное количество металлургических заводов — «Тхай Нгуен», «Хатинь», «Фу Ми», «Хоа Фат» и другие, в результате их работы ежегодно образуется большое количество доменных шлаков, загрязняющих окружающую среду. Поэтому использование таких шлаков для получения бетона будет способствовать повышению экономической эффективности производства и минимизирует загрязнение окружающей среды.

Мировое производство цемента составляет около 3 млрд т в год, в том числе во Вьетнаме — 99 млн т. Изготовление цемента — процесс не только дорогостоящий, но и энергоемкий, способствующий возникновению парникового эффекта из-за выброса углекислого газа. При соблюдении всех нормативных требований к вяжущему веществу в технологии производства бетона часть цемента можно заменить подходящим по составу специально переработанным шлаком. Так как доменные шлаки благодаря своему химико-минералогическому составу (соотношение между SiO_2 , Al_2O_3 и CaO) обладают реакционной способностью, то замена ими части клинкера позволит снизить стоимость композиционного вяжущего, уменьшить потребление электроэнергии и выделяемого тепла и CO_2 [9–11].

Промышленные отходы, в том числе топливные, являются серьезной причиной возникновения проблем экологического характера, вызывающих загрязнение почвы, воды и воздуха окружающей среды во всех провинциях Вьетнама. При этом уровень повторного применения техногенных отходов весьма ограничен и составляет всего около 2–5 % [7, 8].

Тепловая электростанция в индустриальном парке «Вунг Анг», расположенная в центральной части Вьетнама, начала свою работу в 2012 г. Ежегодно она образует примерно 1 млн т различных золошлаковых отходов, которые, помимо загрязнения воздуха, вызывают также серьезное загрязнение морской воды, приведшее в 2016 г. к массовой гибели рыбы и морских животных (рис. 1) [10].



Рис. 1. Загрязнение морской воды техногенными отходами в индустриальном парке «Вунг Анг» (Вьетнам)

Поэтому утилизация отходов сжигания твердого топлива — не столько вопрос экономии материальных ресурсов, сколько необходимость решения проблемы возрастающего загрязнения окружающей среды и, следовательно, здоровья людей.

Так как ЗУ, ДШ и ЗРШ обладают значительной химической активностью, они представляют большой интерес для переработки с целью их вторичного применения.

В странах, производящих рис, в среднем при получении 1 т зерна образуется более 1 т рисовой соломы и шелухи, поэтому существует серьезная проблема их утилизации. Рисовую солому используют в основном для сельскохозяйственных нужд (на корм животным идет до 70 %), а также в строительстве в качестве отделочных и кровельных материалов (до 5 %), остальную солому сжигают непосредственно на полях (до 15 %) или оставляют там, а также в местах обмолота риса для естественного разложения (до 10 %). На сегодняшний день основными направлениями утилизации рисовой соломы являются получение целлюлозы и ее производных продуктов [12, 13], а рисовой шелухи — получение кремнезема в кристаллической и аморфной формах [14], с последующим использованием аморфного кремнезема в технологии строительных материалов.

С 1994 г. во Вьетнаме, как и в других рисопроизводящих странах мира, проводятся различные исследования, направленные на применение рисовой соломы и золы рисовой шелухи (ЗРШ) в производстве строительных материалов [15]. Рассмотрев историю вопроса, можно сделать вывод, что большинство проведенных исследований было направлено на изучение влияния ЗРШ на свойства бетонов и строительных растворов, и почти нет исследований по геополимерному бетону.

Вьетнам расположен в районе внутренних тропиков северного полушария с характерным муссонным типом климата и сильной дифференциацией по сезонам и территории страны, вытянутой с севера на юг более чем на 3200 км вдоль морского побережья, на котором в последние годы наблюдается многократное увеличение числа гидротехнических сооружений [10].

Существенным дополнением к этому служат многочисленные гидротехнические объекты, составляющие систему водохранилищ и каналов по всей территории страны [16].

По результатам анализа, проведенного рядом научно-исследовательских учреждений Вьетнама, более 50 % узлов и конструкций морских и речных гидротехнических сооружений страны приобретают серьезные повреждения или полностью разрушаются после 5–20 лет эксплуатации [11, 13].

В процессе длительной эксплуатации под воздействием грунтовых вод снижаются прочность и долговечность железобетонных конструкций, в бетоне появляются трещины, постепенно истирается защитный слой, в результате чего обнажается и подвергается коррозии стальная арматура [17–19].

Авторы данной статьи изучили возможность использования многотоннажных техногенных отходов (ЗУ, ДШ и золы рисовой) в сочетании с активирующим щелочным раствором (NaOH и Na_2SiO_3) для получения геополимерного бетона на бесцементном вяжущем, обладающего высокими эксплуатационными показателями. В результате экспериментальных исследований был получен бесцементный бетон, который после тепловой обработки при температуре $100\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 часов в возрасте 28 суток показал прочность на сжатие 62 МПа. Также полученный бетон обладает высокой водонепроницаемостью и низким водопоглощением, что по совокупности свойств позволяет использовать его для производства строительных работ в условиях жаркого и влажного климата Вьетнама. Кроме того, производство такого бетона будет способствовать охране окружающей среды за счет экономии природных ресурсов и возможности применения многотоннажных техногенных отходов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы. В работе были использованы следующие сырьевые компоненты.

1. Активные минеральные добавки

Использованные активные минеральные добавки (МДО) включали топливную ЗУ, ДШ и ЗРШ. Для регулирования сроков схватывания бетонной смеси применялся природный двуводный гипс.

Зола уноса

Низкокальциевая ЗУ ТЭС «Вунг Анг» класса F соответствовала требованиям ГОСТ 25818-2017¹, ее влажность составляла 1,15 %, истинная плотность $\rho = 2,19 \text{ г/см}^3$, насыпная плотность — $0,955 \text{ г/см}^3$. Полученные результаты исследования свойств золы показаны в табл. 1.

Доменный шлак

Доменный шлак металлургического завода «Хоа Фат» (Вьетнам) с истинной плотностью $\rho = 2,67 \text{ г/см}^3$ и удельной поверхностью $3600 \text{ см}^2/\text{г}$. Его химический состав приведен в табл. 2.

Зола рисовой шелухи

Зола рисовой шелухи с истинной плотностью $2,32 \text{ г/см}^3$ и насыпной плотностью $\rho = 0,572 \text{ г/см}^3$. Результаты анализа химического состава ЗРШ представлены в табл. 3.

Природный гипс

Природный гипс (ПГ) производства фирмы «Динь Ву» (Вьетнам) с истинной плотностью $2,32 \text{ г/см}^3$, остатком на сите № 008 после просеивания не больше 1 % и влажностью 2,5 %. Его химический состав приведен в табл. 4.

Основные физико-механические показатели использованных АМД соответствовали требованиям

¹ ГОСТ 25818-2017. Золоуноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. М.: Изд-во «Стандарты», 2017. 23 с.

ГОСТ Р 56196-2014², TCVN 10302:2014³ и ASTM C 618-15⁴.

С помощью метода лазерной гранулометрии на приборе ВТ-9300z (КНР) был определен гранулометрический состав ЗУ ТЭС «Вунг Анг», ДШ, ЗРШ и ПГ (рис. 2).

2. Мелкий заполнитель

Мелкий заполнитель песок (П) р. Ло также является очень важной частью бетонной смеси, влияющей на ее свойства. В исследовании использован речной кварцевый песок I класса, соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014⁵ и TCVN 7570:2006⁶. Физико-механические свойства песка представлены в табл. 5.

Гранулометрический состав использованного песка р. Ло показан на рис. 3.

3. Активирующий щелочной раствор

Активирующий щелочной раствор состоял из водных растворов гидроксида и силиката натрия, плотностью соответственно $1,63 \pm 0,01 \text{ г/см}^3$ и $1,42 \pm 0,01 \text{ г/см}^3$, в соотношении $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,5$ [20]; его процентный состав по массе: $\text{NaOH} = 12 \%$; $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 30 \%$ и вода = 58 %.

² ГОСТ Р 56196-2014. Добавки активные минеральные для цементов. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 9 с.

³ TCVN 10302:2014. Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng. NXB Xây dựng. Hà Nội. 2014. 9 p.

⁴ ASTM C618-15. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

⁵ ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. М.: Изд-во «Стандарты», 2014. 7 с.

⁶ TCVN 7570:2006. Cốt liệu cho bê tông và vữa — Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, Vietnam, 2006. 11 p.

Табл. 1. Химический состав ЗУ

Средний химический состав, % масс.									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	Потери при прокаливании
52,33	30,65	7,61	0,29	0,18	0,15	0,61	1,78	0,34	6,06

Табл. 2. Химический состав ДШ

Средний химический состав, % масс.					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Потери при прокаливании
36,38	15,76	0,55	40,12	1,25	5,94

Табл. 3. Химический состав ЗРШ

Средний химический состав, % масс.										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Потери при прокаливании
88,2	1,25	1,75	0,5	1,14	2,67	0,8	0,52	0,15	0,25	2,77

Табл. 4. Химический состав ПГ

Содержание оксидов, %						
SO ₃	CaO	H ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Прочие
42,13	34,27	18,4	2,12	1,37	0,63	1,08

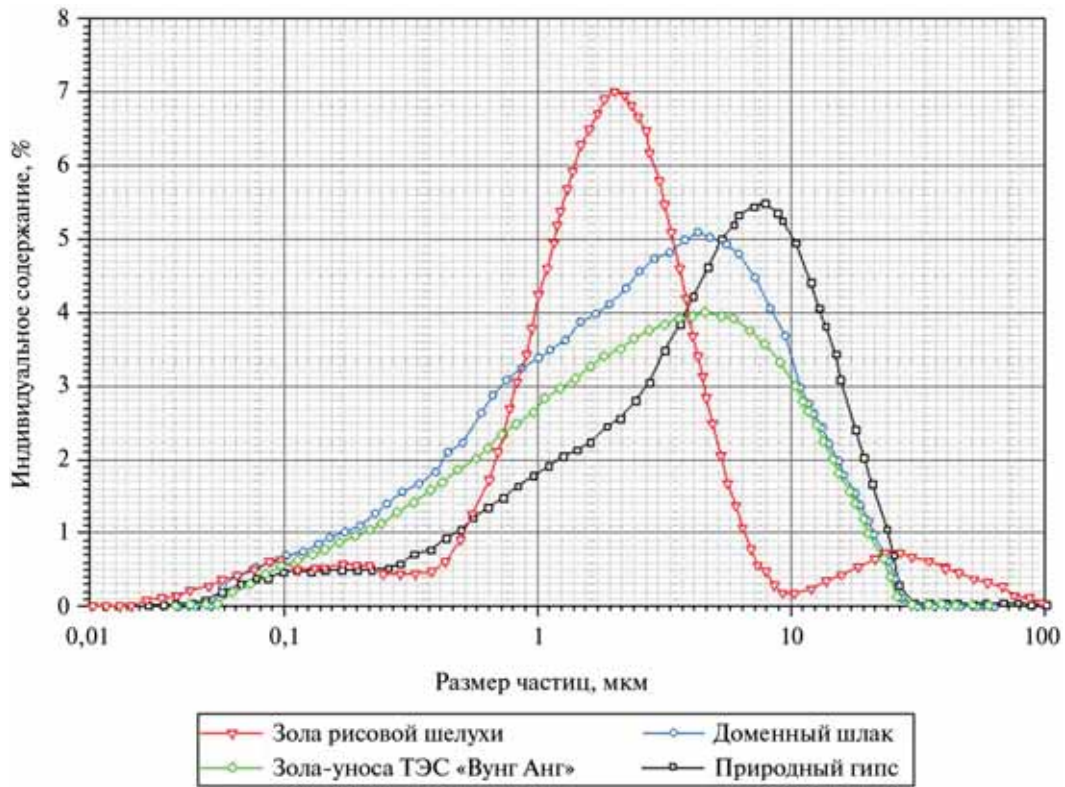


Рис. 2. Гранулометрический состав ЗУ ТЭС «Вунг Анг», ДШ, ЗРШ, ПГ

Табл. 5. Физико-механические свойства песка р. Ло

п/п	Свойства	Единица	Результаты эксперимента
1	Модуль крупности	—	2,56
2	Истинная плотность	г/см ³	2,65
3	Насыпная плотность	г/см ³	1,62
4	Пустотность	%	39,1
5	Содержание пыли, глины и других примесей	%	0,91

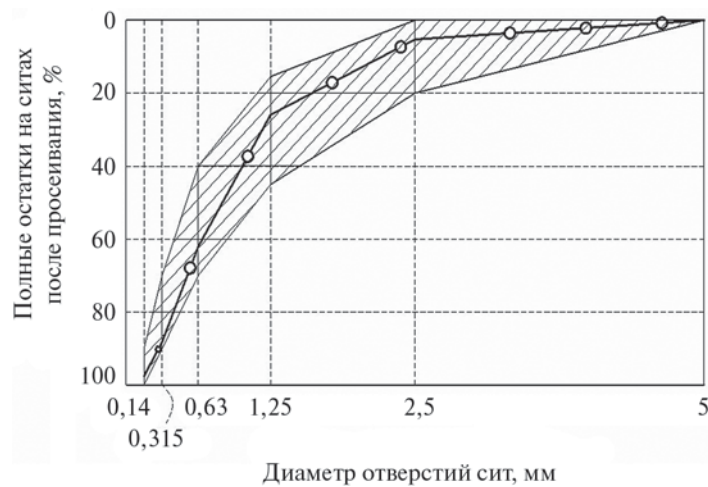


Рис. 3. Гранулометрический состав песка р. Ло

4. Суперпластификатор

Для снижения водопотребности, при изготовлении геополимерного бетона (ГПБ) использовали поликарбоксилатный суперпластификатор SR 5000F (SR5000) производства фирмы Silk Road с плотностью 1,1 г/см³ при температуре 20±5 °С. Это — суперпластификатор типа G в соответствии с требованием ASTM C494⁷.

Методы. Методология работы включала:

- изучение размеров частиц сырьевых материалов, которое проводили с помощью метода лазерной гранулометрии на приборе ВТ-9300z (КНР);
- для определения предварительного состава геополимерной бетонной смеси применили метод абсолютных объемов;
- удобоукладываемость бетонной смеси определяли по ее расплыву в мм по ASTM C1611-18⁸ и TCVN 3106:2007⁹ с помощью усеченного миниконуса 70 × 80 × 40 мм;
- среднюю плотность бетонов определяли на образцах-кубах размером 100 × 100 × 100 мм согласно ГОСТ 12730.1-78¹⁰;
- прочность бетонов на сжатие устанавливали испытанием образцов-кубов размером 100 × 100 × 100 мм, а на растяжение при изгибе на образцах-призмах размером 100 × 100 × 400 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012¹¹;
- водонепроницаемость ГПБ находили по ГОСТ 12730.5-2018¹² по методу мокрого пятна;
- водопоглощение бетонов рассчитывали по ГОСТ 12730.3-78¹³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Состав геополимерного бесцементного бетона

Разрабатываемый ГПБ должен обладать:

- прочностью на сжатие порядка 60 МПа в возрасте 28 суток после тепловой обработки при температуре 100 °С в течение шести часов в соответствии с требованиями национального стандарта Вьетнама

⁷ ASTM C494. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. 2019. 21 p.

⁸ ASTM C1611-18. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. 2018. 20 p.

⁹ TCVN 3106:2007. Hỗn hợp bê tông nặng — Phương pháp thử độ sụt. NXB Xây dựng. Hà Nội. 2007. 10 p.

¹⁰ ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. М. : Изд-во «Стандарты», 2007. 5 с.

¹¹ ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М. : Изд-во «Стандарты», 2013. 35 с.

¹² ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. М. : Изд-во «Стандарты», 2018. 26 с.

¹³ ГОСТ 12730.3-78. Бетоны. Метод определения водопоглощения. М. : Изд-во «Стандарты», 2007. 6 с.

TCVN 10306:2014¹⁴, согласно которому высокопрочный бетон к указанному возрасту твердения имеет прочность более 55 МПа;

- высокой водонепроницаемостью (не менее W10) и низким водопоглощением (не более 4 % по массе) по требованиям национального стандарта Вьетнама TCVN 9139:2012¹⁵.

Проектирование предварительного состава ГПБ приведено ниже.

Расчет состава геополимерной бетонной смеси производился по методу абсолютных объемов. Согласно этому методу, расход всех компонентов бетонной смеси должен быть таким, чтобы сумма их абсолютных объемов составляла 1000 л, т.е. 1 м³ [8, 11, 14]:

$$\frac{3У}{\gamma_{3У}} + \frac{ДШ}{\gamma_{ДШ}} + \frac{ЗРШ}{\gamma_{ЗРШ}} + \frac{ПГ}{\gamma_{ПГ}} + \frac{NaOH}{\gamma_{NaOH}} + \frac{Na_2SiO_3}{\gamma_{Na_2SiO_3}} + \frac{П}{\gamma_{П}} + \frac{SR5000}{\gamma_{SR5000}} + BB = 1000, \quad (1)$$

где 3У, ДШ, ЗРШ, ПГ, NaOH, Na₂SiO₃, П, SR5000 — соответственно расходы золы-уноса, доменного шлака, золы рисовой шелухи, природного гипса, раствора NaOH, раствора Na₂SiO₃, песка и суперпластификатора SR 5000F, кг; $\gamma_{3У}$, $\gamma_{ДШ}$, $\gamma_{ЗРШ}$, $\gamma_{ПГ}$, γ_{NaOH} , $\gamma_{Na_2SiO_3}$, $\gamma_{П}$ и γ_{SR5000} — соответственно истинные плотности золы-уноса, доменного шлака, золы рисовой шелухи, природного гипса, раствора NaOH, раствора Na₂SiO₃, песка и суперпластификатора SR 5000F, г/см³ (табл. 6); BB — объем вовлеченного воздуха, л.

Исходные соотношения сырьевых компонентов по массе в бетонной смеси, выбранные для проектирования состава ГПБ в результате проведенных исследований и анализа научно-технической литературы [10, 12, 21, 22], приведены в табл. 7.

Для исследования выбраны следующие соотношения $\frac{AP}{MDO} = 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60$.

С помощью метода абсолютных объемов, а также последующей корректировки на основании полученных экспериментальных результатов, рассчитаны составы бетонных смесей для получения бесцементных ГПБ с прочностью на сжатие до 60 МПа после тепловой обработки при температуре 100 °С в течение шести часов. Составы изученных бетонных смесей показаны в табл. 8.

¹⁴ TCVN 10306:2014. Bê tông cường độ cao – Thiết kế thành phần mẫu hình trụ. Hanoi, 2014. 24 p.

¹⁵ TCVN 9139:2012. Công trình thủy lợi – Kết cấu bê tông, bê tông cốt thép vùng ven biển - Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, 2012. 15 p.

Табл. 6. Истинная плотность использованных сырьевых материалов

Сырьевые материалы	ЗУ	ДШ	ЗРШ	ПГ	NaOH	Na ₂ SiO ₃	П	SR5000
Истинная плотность, г/см ³	2,35	2,92	2,25	2,31	1,63	1,42	2,65	1,15

Табл. 7. Соотношение сырьевых компонентов по массе в бетонной смеси

Отношения	$\frac{ЗУ}{МДО^{(*)}}$	$\frac{ДШ}{МДО}$	$\frac{ЗРШ}{МДО}$	$\frac{ПГ}{МДО}$	$\frac{AP}{МДО}$	$\frac{П}{МДО}$	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$	$\frac{SR5000}{МДО}$	ВВ
Величина	0,45	0,3	0,2	0,05	от 0,25 до 0,6	1,3	2,5	0,005	3 %

Примечание: ^(*)МДО = ЗУ + ДШ + ЗРШ + ПГ.

Табл. 8. Составы геополимерных бетонных смесей

Составы	$\frac{AP}{МДО}$	МДО, кг	Минеральные добавки				Активирующий раствор		П, кг	SR5000, л
			ЗУ, кг	ДШ, кг	ЗРШ, кг	ПГ, кг	NaOH, кг	Na ₂ SiO ₃ , кг		
1	0,25	907	408	272	181	45	65	162	1179	4,5
2	0,30	879	396	264	176	44	75	188	1143	4,4
3	0,35	853	384	256	171	43	85	213	1109	4,3
4	0,40	828	373	249	166	41	95	237	1077	4,1
5	0,45	805	362	242	161	40	104	259	1047	4,0
6	0,50	783	352	235	157	39	112	280	1018	3,9
7	0,55	762	343	229	152	38	120	299	991	3,8
8	0,60	742	334	223	148	37	127	318	965	3,7

2. Экспериментальные результаты определения удобоукладываемости и средней плотности бетонных смесей и ГПБ

Удобоукладываемость бесцементных бетонных смесей для получения ГПБ оценивали по расплыву конуса (РК) в мм в соответствии с требованиями ASTM C1611-18⁸ и TCVN 3106:2007¹⁶. Испытания проводили с помощью усеченного миниконуса, изображенного на рис. 4, путем измерения диаметра расплыва в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (рис. 5).

Экспериментальные результаты определения удобоукладываемости, средней плотности бетонных смесей и ГПБ представлены в табл. 9.

Из экспериментальных результатов определения подвижности бетонных смесей следует, что по этому показателю качества разработанные бетонные смеси удовлетворяют требованиям стандартов TCVN 8218:2009¹⁷ (Строительство морских и прибрежных сооружений — Технические требования) и TCVN 9139:2012¹⁸ (Бетонные конструкции для морских сооружений — Технические требования).

¹⁶ TCVN 3106:2007. Hỗn hợp bê tông nặng — Phương pháp thử độ sụt. Hanoi, 2010. 10 p.

¹⁷ TCVN 8218:2009. Bê tông thủy công — Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, 2009. 12 p.

¹⁸ TCVN 9139:2012. Công trình thủy lợi — Kết cấu bê tông, bê tông cốt thép vùng ven biển — Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, 2012. 15 p.

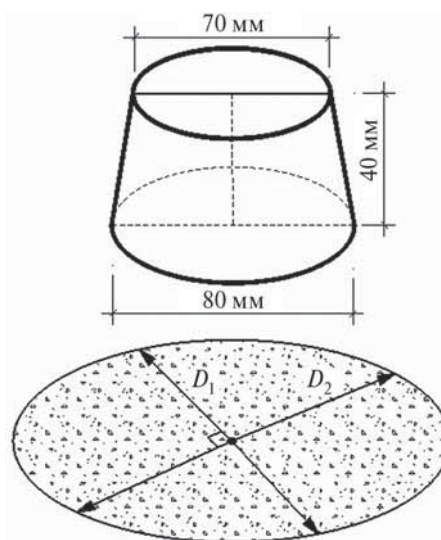


Рис. 4. Усеченный миниконус для определения расплыва бетонной смеси



Рис. 5. Определение удобоукладываемости геополимерных бетонных смесей по РК

Табл. 9. Удобоукладываемость и средняя плотность геополимерных бетонных смесей и ГПБ, водонепроницаемость и водопоглощение разработанных бетонов

Составы	AP МДО	Расплав конуса, мм	Средняя плотность бетонных смесей, кг/м ³	Средняя плотность ГПБ, кг/м ³	Водонепрони- цаемость, МПа	Водопоглощение, % масс.
1	0,25	180	2318	2237	1,0	3,9
2	0,30	190	2291	2218	1,0	3,9
3	0,35	190	2265	2210	1,8	2,5
4	0,40	200	2241	2189	1,2	3,7
5	0,45	210	2218	2180	0,8	4,2
6	0,50	220	2196	2108	0,8	4,3
7	0,55	230	2176	2100	0,6	5,4
8	0,60	230	2157	2100	0,4	6,8

В ходе проведенных экспериментов установлено, что полученные бетонные смеси однородны и не проявляют тенденции к расслоению и водоотделению.

Кроме того, из экспериментальных результатов испытаний ГПБ-образцов можно сделать вывод о повышении водонепроницаемости и снижении водопоглощения разработанных ГПБ с ростом их плотности.

3. Прочность на сжатие и растяжение при изгибе ГПБ-образцов в разном возрасте твердения

Бетонные образцы в форме кубов размером 150 × 150 × 150 мм изготавливались в соответствии с ГОСТ 10180-2012 и TCVN 3118:2012¹⁹. Результаты установления прочности разработанных ГПБ на сжа-

тие в разном возрасте твердения и на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток, а также после их тепловой обработки при температуре 100 °С в течение шести часов приведены в табл. 10, 11 и на рис. 6, 7.

Из приведенных в табл. 10, 11 и на рис. 6, 7 экспериментальных результатов видно, что прочность образцов ГПБ-бетонов как на сжатие, так и на растяжение, при изгибе зависит от соотношения $\frac{AP}{МДО}$.

Причем, на фоне установленной общей тенденции снижения прочности с ростом указанного соотношения, наибольшие ее значения наблюдаются при величине этого соотношения, равной 0,35. Термообработка бетонных образцов привела к повышению 28-суточной прочности на сжатие на 63–89 %, а на растяжение при изгибе на 35–66 %.

¹⁹ TCVN 9334:2012. Bê tông nặng — Phương pháp xác định cường độ nén bằng súng bêt nẩy. Hanoi, 2012. 09 p.

Табл. 10. Прочность на сжатие и растяжение при изгибе ГПБ-образцов в разном возрасте нормального твердения

Составы	AP МДО	Прочность на сжатие, МПа					Прочность на растяжение при изгибе, МПа
		3 сут	7 сут	14 сут	28 сут	90 сут	
1	0,25	20,4	25,2	30,1	34,4	38,7	3,65
2	0,30	24,3	32,6	34,3	36,6	40,6	3,45
3	0,35	25,7	33,4	36,2	37,8	43,3	3,72
4	0,40	23,6	28,2	33,4	35,4	38,9	3,44
5	0,45	18,2	21,3	27,7	28,7	31,2	2,78
6	0,50	14,4	19,8	23,4	25,6	28,3	2,54
7	0,55	12,1	15,7	18,6	20,1	23,1	2,12
8	0,60	12,3	14,2	17,9	19,2	22,7	2,20

Табл. 11. Прочность на сжатие и растяжение при изгибе ГПБ-образцов в разном возрасте после тепловой обработки при температуре 100 °С в течение шести часов

Составы	AP МДО	Прочность на сжатие, МПа					Прочность на растяжение при изгибе, МПа
		3 сут	7 сут	14 сут	28 сут	90 сут	
1	0,25	31,4	44,2	54,1	58,3	62,5	4,95
2	0,30	35,5	48,4	56,1	60,1	65,7	5,75
3	0,35	36,8	50,9	57,2	62,4	66,1	6,10
4	0,40	34,4	42,1	52,7	58,2	60,6	5,45
5	0,45	27,1	32,3	43,1	47,1	51,7	4,43
6	0,50	21,3	30,1	37,6	41,3	45,9	3,87
7	0,55	18,7	22,4	29,9	33,1	37,4	3,10
8	0,60	17,8	21,4	28,8	32,2	36,8	2,98

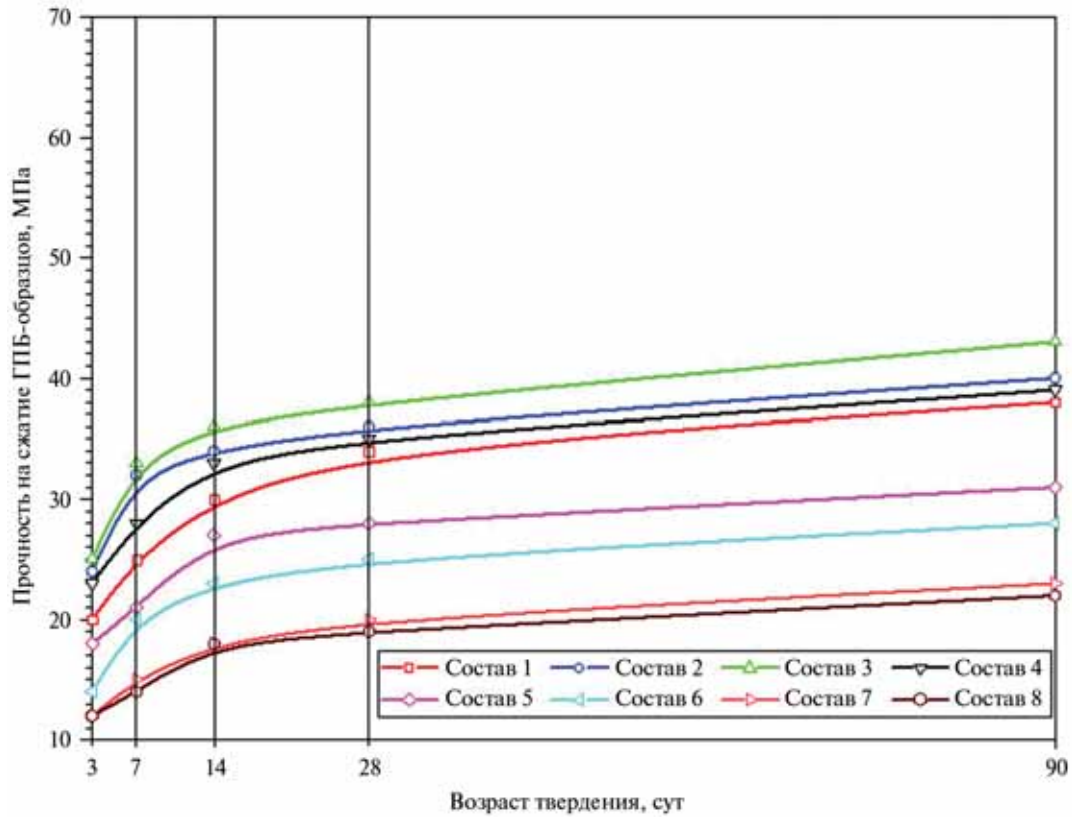


Рис. 6. Зависимость прочности на сжатие ГПБ-образцов от их состава и возраста в разном возрасте нормального твердения

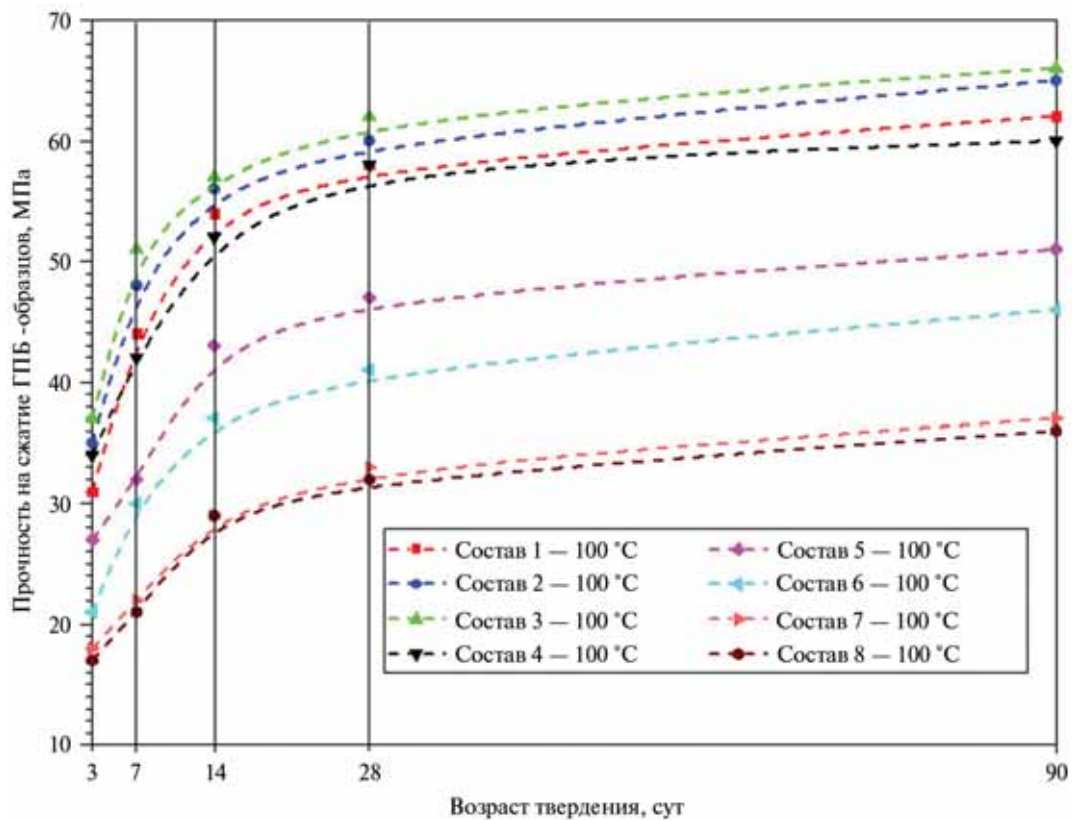


Рис. 7. Зависимость прочности на сжатие ГПБ-образцов от их состава и возраста после тепловой обработки при температуре 100 °С в течение шести часов

Прочность разработанных бетонов на сжатие в возрасте трех суток твердения составила от 51 до 66 % от их 28-суточной прочности, а к седьмым суткам твердения — от 65 до 82% указанной прочности, что свидетельствует о высоком темпе набора прочности в раннем возрасте. Полученные результаты можно объяснить активирующим действием щелочного раствора $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$, который вступает во взаимодействие с алюминатными и силикатными составляющими использованных активных минеральных добавок с образованием быстро схватывающейся гелевой полимерной системы, обладающей вяжущими свойствами [20, 21].

ВЫВОДЫ

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Используя местные для Вьетнама сырьевые материалы, включая многотоннажные техногенные отходы в виде топливной ЗУ, ДШ и ЗРШ, что будет

способствовать защите окружающей среды, можно получить ГПБ на бесцементном вяжущем, который без термообработки достигает к 28 суткам твердения прочности на сжатие 38 МПа и на растяжение при изгибе 3,72 МПа. Тепловая обработка при 100 °С в течение шести часов приводит к увеличению указанных прочностных показателей соответственно до 62 и 6,1 МПа.

Высокий темп набора прочности на сжатие в раннем возрасте делает ГПБ перспективным строительным материалом. Кроме того, производство такого бетона будет способствовать охране окружающей среды за счет экономии природных ресурсов и возможности применения многотоннажных техногенных отходов.

Необходимо продолжить исследования физико-механических свойств и эксплуатационных показателей разработанных ГПБ с целью определения наиболее рациональных областей их применения для строительных работ в условиях жаркого и влажного климата Вьетнама.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sathawane S.H., Vairagade V.S., Kene K.S.* Combine effect of rice husk ash and fly ash on concrete by 30 % cement replacement // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 35–44. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.009
2. *Abdel-Ghani N.T., El-Sayed H.A., El-Habak A.A.* Utilization of by-pass cement kiln dust and air-cooled blast-furnace steel slag in the production of some “green” cement products // *HBRC Journal*. 2018. Vol. 14. Issue 3. Pp. 408–414. DOI: 10.1016/j.hbrj.2017.11.001
3. *Lei Y., Zhang Q., Nielsen C., He K.* An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990–2020 // *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45. Issue 1. Pp. 147–154. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.09.034
4. *Каргин А.А., Маликов И.М.* Геополимерный бетон // *Россия молодая* : сб. мат. XI Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2019. С. 60613.
5. *Гончарова М.А., Матченко Н.А.* Разработка составов геополимерного бетона для конструкционного материала // *Научные исследования: от теории к практике*. 2015. Т. 2. № 4 (5). С. 15–18.
6. *Pham Chi Cuong.* The use of waste from the metallurgical industry in Vietnam // *Journal of Science of Vietnam*. 2012. Vol. 6. Issue 10. Pp. 52–54.
7. *Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Орехова А.Ю. и др.* Использование золошлаковых отходов в качестве дополнительного цементирующего материала // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2018. № 8. С. 19–27. DOI: 10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511
8. *Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А.* Возможность использования зольных остатков для производства материалов строительного назначения во Вьетнаме // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 6. С. 6–12. DOI: 10.12737/article_5926a059214ca0.89600468
9. *Горбунов Г.И., Расулов О.Р.* Использование рисовой соломы в производстве керамического кирпича // *Вестник МГСУ* 2014. № 11. С. 128–136.
10. *Lam Van Tang, Hung Xuan Ngo, Dien Vu Kim, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V.* Effect of complex organo-mineral modifier on the properties of corrosion-resistant concrete // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. P. 01005. DOI: 10.1051/mateconf/201825101005
11. *Si -Huy Ngo, Trong-Phuoc Huynh, Thanh-Tam Thi Le, Ngoc-Hang Thi Mai.* Effect of high loss on ignition-fly ash on properties of concrete fully immersed in sulfate solution // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 371. P. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/371/1/012007
12. *Tang Van Lam, Bulgakov B., Bazhenov Y., Aleksandrova O., Pham Ngoc Anh.* Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. P. 032007. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032007
13. *Ngo Van Toan.* Research on the production of high-strength concrete using fine sand and mineral

additives mixed with activated blast-furnace slag and rice husk ash // Magazine Building Materials – Environment. 2012. No. 4. Pp. 36–45.

14. *Viet-Thien-An Van, Rößler C., Danh-Dai Bui, Ludwig H.-M.* Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete // Cement and Concrete Composites. 2014. Vol. 53. Pp. 270–278. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015

15. *Saad S.A., Nuruddin M.F., Shafiq N., Ali M.* Pozzolanic reaction mechanism of rice husk ash in concrete – a review // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 773–774. Pp. 1143–1147. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1143

16. *Ануфриева Е.В.* Коррозионноустойчивый бетон для гидротехнического строительства // Градостроительные аспекты устойчивого развития крупных городов. 2009. № 93. С. 537–541.

17. *Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен, Нгуен Чонг Чык, Булгаков Б.И., Баженова О.Ю. и др.* Влияние водовяжущего отношения и комплексной органоминеральной добавки на свойства бетона для морских гидротехнических сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 11–21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21

18. *Santhanam M., Cohen M.D., Olek J.* Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars // Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36. Issue 12. Pp. 2132–2137. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.09.011

19. *Chindaprasirt P., Kanchanda P., Sathonsaowaphak A., Cao H.T.* Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash // Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21. Issue 6. Pp. 1356–1361. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.10.005

20. *Thomas R.J., Peethamparan S.* Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress–strain behavior // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. Pp. 49–56. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.039

21. *Liu Y., Zhu W., Yang E.H.* Alkali-activated ground granulated blast-furnace slag incorporating incinerator fly ash as a potential binder // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 112. Pp. 1005–1012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.153

22. *Фаликман В.Р., Охотникова К.Ю.* Геополимерные вяжущие и бетоны в современном строительстве // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 4–1 (35). С. 93–97.

Поступила в редакцию 9 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 24 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 25 мая 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Танг Ван Лам** — кандидат технических наук, преподаватель факультета гражданского строительства; **Ханойский горно-геологический университет**; Вьетнам, г. Ханой, Бак Ту Лиен, 18 Фо Виен, Дык Тханг; SPIN-код: 3214-6263, Scopus: 57201185702, ResearcherID: G-2948-2018, ORCID: 0000-0002-4857-835X; lamvantang@gmail.com;

Нго Суан Хунг — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; xuanhung1610@mgsu.ru;

Ву Ким Зиен — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3744-3059, Scopus: 57205216458, ResearcherID: AAQ-3813-2020, ORCID: 0000-0002-3367-9043; kimdienxdtb@mgsu.ru;

Борис Игоревич Булгаков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5583-1897, Scopus: 57192383523, ResearcherID: H-1884-2018, ORCID: 0000-0002-4737-8524; BulgakovBI@mgsu.ru;

Софья Ильдаровна Баженова — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3439-4221, Scopus: 57194452989, ResearcherID: S-2766-2018, ORCID: 0000-0002-6111-201X; BazhenovaSI@mgsu.ru;

Ольга Владимировна Александрова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 790072, Scopus: 57194450051, 57192372475, ORCID: 0000-0003-1791-8515; AleksandrovaOV@mgsu.ru.

INTRODUCTION

In recent years, a new concrete mixture production method was proposed. This concrete mixture does not contain any cement, since it can be replaced with large-tonnage waste, including pulverized fuel ash (FA), blast furnace slag (BFS), etc. At the same time, in terms of strength, cement-free concrete, obtained as a result of curing this mixture, will be comparable with traditional concretes that contains cement. A special alkaline solution, that “melts” industrial waste and binds the mixture components in the same way as cement, is a necessary component used to make this concrete. This material will have higher fire and corrosion resistance. The use of cement-free concrete can improve the environment, due to lower carbon dioxide emissions into the atmosphere, up to 10 % of which are formed as a result of the Portland cement production [1–3].

The problem of environmental improvement through the rational use of large-tonnage industrial waste is severe, since the ash and slag waste, generated by energy generating enterprises each year, exceeds 25 million tons and occupies the area of more than 20 thousand hectares in the Russian Federation [4, 5].

According to the report, issued by the Ministry of Industry and Trade of Vietnam, this country has 21 coal-fired thermal power plants, emitting almost 20 million tons of ash and slag per year, which need landfills with the total area of more than 800 hectares. It was expected that by 2020 12 more coal-fired power plants would operate, hence, annual ash and slag emissions will go up to 23–25 million tons. This move will negatively affect the environment and cause water pollution. Although industrial waste (FA, BFS) is used in the production of some types of building materials (for example, fired bricks production, roadway leveling), their use is limited and it reaches about 5–10 million tons per year [6–8].

A significant number of metallurgical plants operate in Vietnam. They are Thai Nguyen, Ha Tinh, Phu Mi, Hoa Phat and others. As a result of their work, a large amount of blast furnace slag that pollutes the environment is formed annually. Therefore, the use of such slag in the concrete production will increase its economic efficiency and minimize environmental pollution.

The world production of cement is about 3 billion tons per year, 99 million tons are produced in Vietnam. Cement production is not only an expensive process, it is energy intensive and it contributes to the greenhouse effect due to the emission of carbon dioxide. If all regulatory requirements applicable to the concrete binder are met in the course of production, some portion of the cement can be replaced with processed slag having a suitable composition. Since blast furnace slags are reactive due to their chemical and mineralogical composition (the ratio of SiO_2 , Al_2O_3 and CaO), their ability to replace some of the clinker will reduce the cost of the composite binder, reduce the consumption of electricity, heat and CO_2 emissions [9–11].

Industrial waste, including waste fuel, is a significant cause of environmental problems and the pollution of soil, water and air in all the provinces of Vietnam. At the same time, the reusability of technogenic waste is very limited, and it reaches about 2–5 % [7, 8].

A thermal power plant, located in Vung Ang industrial park in the central part of Vietnam, started working in 2012. It generates about 1 million tons of various ash and slag waste a year, and in addition to air pollution, this waste pollutes sea water. This pollution caused mass death of fish and marine animals in 2016 (Fig. 1) [10].



Fig. 1. Pollution of sea water by the technogenic waste in Vung Ang industrial park (Vietnam)

Therefore, the reclamation of waste generated as a result of combustion of solid fuels is not so much a matter of saving material resources as the need to solve the problem of growing environmental pollution which has an adverse impact on human health.

Since FA, BFS and RHA are chemically active, they can be recycled and reused.

In rice-producing countries, over 1 ton of rice straw and husk is produced per 1 ton of grain, so there is a serious problem of their disposal. Rice straw is mainly used in agriculture (up to 70 % is used as animal feed), and in construction as finishing and roofing materials (up to 5 %), the rest is burned directly in the fields (up to 15 %) or left there, as well as in places where rice is threshed for natural decomposition (up to 10 %). Today, rice straw is mainly used in the production of cellulose and its derivatives [12, 13], and rice husk is used in the production of crystalline and amorphous silica [14], and the latter is used to make building materials. Since 1994, in Vietnam and in other rice-producing countries of the world, various studies have been carried out to explore the use of rice straw and rice husk ash (RHA) in the production of building materials [15]. Having reviewed the history of these studies, we can conclude that the majority of the researches was aimed at studying the effect of RHA on the properties of concrete and mortar, and very few of them were focused on geopolymer concrete.

Vietnam is located in the tropical region of the northern hemisphere; it has monsoon type of climate and its seasons and regions feature different weather conditions, since its territory is stretched from north to

south along the sea coast and this distance reaches 3,200 km. In recent years there has been a manifold increase in the number of hydrotechnical structures there [10].

Besides, numerous hydrotechnical facilities make up the system of reservoirs and canals all over the country [16].

According to the analysis carried out by a number of research institutions in Vietnam, more than 50 % of constructions of sea and river hydraulic structures in the country become seriously damaged or completely destroyed after 5–20 years of operation [11, 13].

In the course of the long-term operation, the strength and durability of reinforced concrete structures decrease under the influence of the groundwater, cracks appear in the concrete, the protective layer gradually wears out, and the steel reinforcement is corroded [17–19].

The co-authors of this article studied the potential use of large-tonnage technogenic waste (FA, BFS and rice ash) coupled with an activating alkaline solution (NaOH and Na₂SiO₃) to obtain geopolymer concrete that has a high-performance cement-free binder. As a result of experimental studies, cement-free concrete was obtained, which showed a compressive strength of 62 MPa in the aftermath of its six-hour heat treatment at the temperature of 100 °C at the age of 28 days. Also, the resulting concrete has high water resistance and low water absorption, which, in terms of its combination of properties, makes it usable for construction purposes in the hot and humid climate of Vietnam. In addition, the production of this concrete will contribute to environmental protection; it will save natural resources and ensure the cyclability of large-tonnage technogenic waste.

MATERIALS AND METHODS

Materials. The following raw materials were used in the work.

1. Active mineral additives

Active mineral additives (AMA), used in the project, included fuel FA, BFS and RHA. Natural dihydrate gypsum was applied to regulate the setting time of the concrete mixture.

Fly ash

Class F low-calcium fly ash generated by Vung Ang thermal power plant met the requirements of GOST 25818-2017¹; its moisture content was 1.15 %, true density $\rho = 2.19 \text{ g/cm}^3$, bulk density — 0.955 g/cm^3 . The results of the study of ash properties are shown in Table 1.

Blast furnace slag

The chemical composition of the blast furnace slag, having true density $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$ and the unit surface area of $3,600 \text{ cm}^2/\text{g}$, is produced by Hoa Fat metallurgical plant (Vietnam). Its chemical composition is shown in Table 2.

Rice husk ash

Rice husk ash with a true density of 2.32 g/cm^3 and bulk density $\rho = 0.572 \text{ g/cm}^3$. The results of the analysis of the chemical composition of the RHA are presented in Table 3.

¹ GOST 25818-2017. Fly ash from thermal power plants used for concretes. Technical specifications. Moscow, Standarty Publ., 2017; 23.

Table 1. The chemical composition of fly ash

Average chemical composition, mass. %									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	Ignition loss
52.33	30.65	7.61	0.29	0.18	0.15	0.61	1.78	0.34	6.06

Table 2. Chemical composition of BFS

Average chemical composition, mass. %					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Ignition loss
36.38	15.76	0.55	40.12	1.25	5.94

Table 3. Chemical composition of RHA

Average chemical composition, mass. %										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Ignition loss
88.2	1.25	1.75	0.5	1.14	2.67	0.8	0.52	0.15	0.25	2.77

Table 4. Chemical composition of NG

Content of oxides, %						
SO ₃	CaO	H ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Other
42.13	34.27	18.4	2.12	1.37	0.63	1.08

Natural gypsum

Natural gypsum (NG) produced by Dinh Wu (Vietnam) with a true density of 2.32 g/sm³, post-sieving residue (sieve No. 008) is not more than 1 %, and the moisture content of 2.5 %. Its chemical composition is provided in Table 4.

Principal physical and mechanical properties of the AMA used in the project met the requirements of GOST R 56196-2014², TCVN 10302:2014³ and ASTM C 618-15⁴.

² GOST R 56196-2014. Active mineral additives for cements. General technical specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2015; 9.

³ TCVN 10302:2014. Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng. NXB Xây dựng. Hà Nội, 2014; 9.

⁴ ASTM C618-15. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

The granulometric composition of FA from TPP Vung Ang, BFS, RHA and NG was determined using unit BT-9300z and the method of laser granulometry (China) (Fig. 2).

2. Fine aggregate

Sand (S), coming from the Lo river, serves as a fine aggregate which is also a very important component of the concrete mixture, affecting its properties. The co-authors used class I river quartz sand, which meets the requirements of GOST 8736-2014⁵ and TCVN 7570:2006⁶. The physical and mechanical properties of sand are presented in Table 5.

Granulometric composition of the sand is shown in Fig. 3.

⁵ GOST 8736-2014. Sand for construction work. Technical conditions. Moscow, Standards Publ., 2014.

⁶ TCVN 7570:2006. Cốt liệu cho bê tông và vữa — Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, Vietnam, 2006; 11.

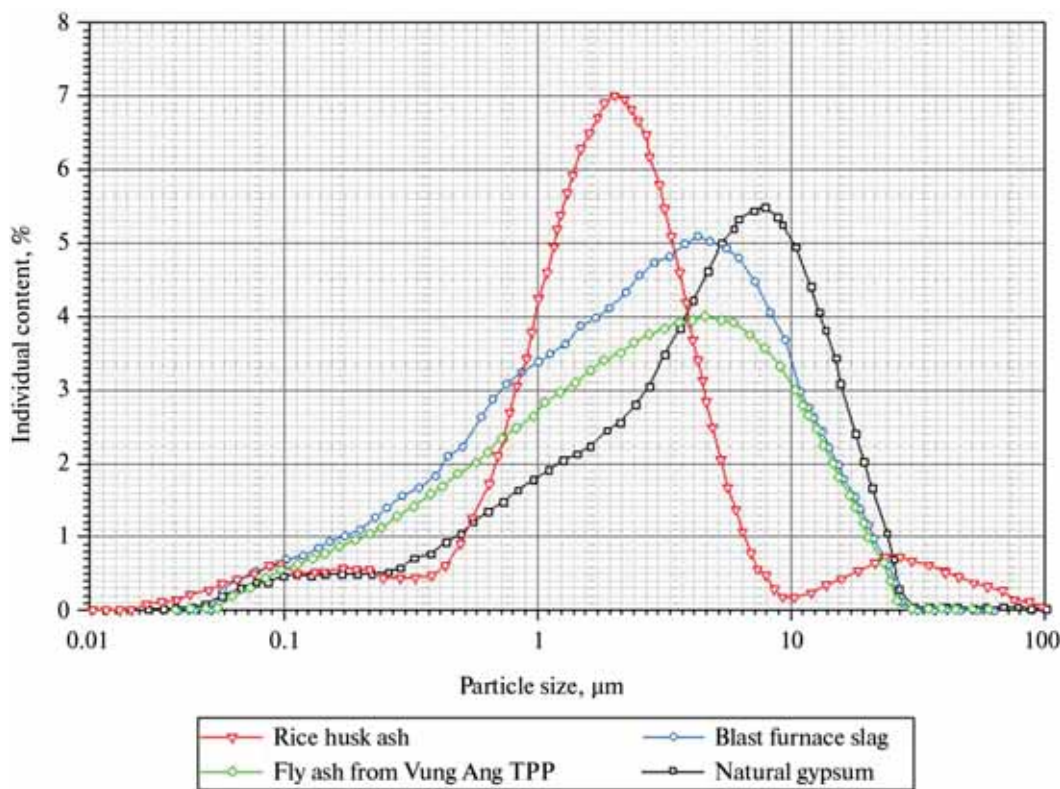


Fig. 2. Granulometric composition of FA from TPP Vung Ang, BFS, RHA and NG

Table 5. Physical and mechanical properties of sand brought from the Lo river.

No.	Properties	Measurement unit	Experiment results
1	Size module	—	2.56
2	True density	g/cm ³	2.65
3	Bulk density	g/cm ³	1.62
4	Porosity	%	39.1
5	Content of dust, clay and other impurities	%	0.91

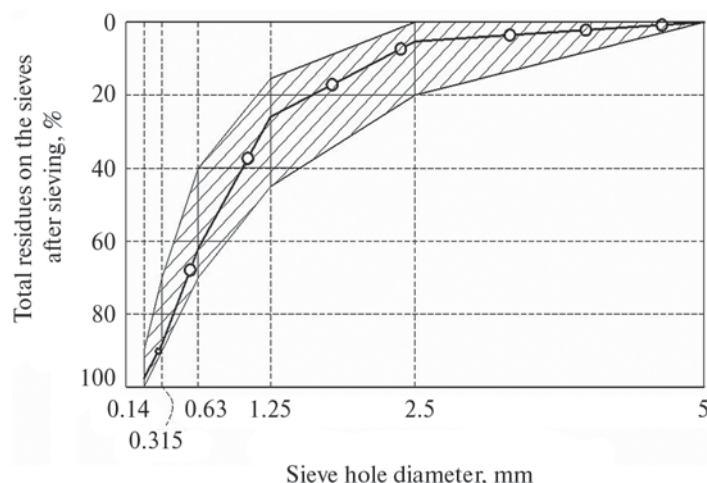


Fig. 3. Granulometric composition of the sand

3. Activating alkaline solution

An activating alkaline solution, consisting of the aqueous solutions of sodium hydroxide and silicate, having a density of $1.63 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ and $1.42 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$, respectively, at the ratio of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$ [20]; its percentage by weight: $\text{NaOH} = 12\%$; $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 30\%$ and water = 58% .

4. Superplasticizer

To reduce the water consumption, polycarboxylate superplasticizer SR 5000F (SR5000), manufactured by Silk Road, with a density of 1.1 g/cm^3 at the temperature of $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, was used to make geopolymer concrete (GPC). It is the type G superplasticizer pursuant to ASTM C494⁷.

Methods. The methodology of the work encompassed:

- the study of sizes of raw material particles performed by the laser granulometry method using BT-9300z (PRC) machine;
- the method of absolute volumes used to determine the preliminary composition of the geopolymer concrete mixture;
- concrete workability was determined by its spread (in mm) identified using a truncated mini-cone $70 \times 80 \times 40 \text{ mm}$ pursuant to ASTM C 1611-18⁸ and TCVN 3106:2007⁹;
- average concrete density was determined using cube samples $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ in accordance with GOST 12730.1-78¹⁰;
- the compressive strength of the concrete was identified using cube-shaped specimen whose dimensions were equal to $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$, and the tensile

flexural strength was identified with the help of prism-shaped specimens $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ each in accordance with GOST 10180-2012¹¹;

- the impermeability was identified according to GOST 12730.5-2018¹² by the wet spot method;
- the water absorption of concrete was calculated according to GOST 12730.3-78¹³.

RESULTS OF THE STUDY

1. Composition of geopolymer cement-free concrete

The geopolymer concrete (GPC) must have the following properties:

- compressive strength about 60 MPa on the 28th day following the heat treatment at $100 \text{ }^\circ\text{C}$ for six hours in accordance with the national standard of Vietnam TCVN 10306:2014¹⁴, according to which high-strength concretes must have a strength of more than 55 MPa;
- high water resistance (no less than W10) and low water absorption (no more than 4% by mass) according to the requirements of the national standard of Vietnam TCVN 9139:2012¹⁵.

The design of the preliminary composition of the GPC is provided below.

The calculation of the composition of the geopolymer concrete mixture was carried out using the method of absolute volumes. According to this method, the con-

⁷ ASTM C494. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. 2019; 21.

⁸ ASTM C1611-18. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. 2018; 20.

⁹ TCVN 3106:2007. Hỗn hợp bê tông nặng — Phương pháp thử độ sụt. NXB Xây dựng. Hà Nội. 2007; 10.

¹⁰ GOST 12730.1-78. Concrete. Methods for determining density. Moscow, Standards Publ., 2007; 5.

¹¹ GOST 10180-2012. Concrete. Methods for determining the strength of benchmark samples. Moscow, Standards Publ., 2013; 35.

¹² GOST 12730.5-2018. Concrete. Methods for determining water resistance. Moscow, Standards Publ., 2018; 26.

¹³ GOST 12730.3-78. Concrete. Method for determining water absorption. Moscow, Standards Publ., 2007; 6.

¹⁴ TCVN 10306:2014. Bê tông cường độ cao — Thiết kế thành phần mẫu hình trụ. Hanoi, 2014; 24.

¹⁵ TCVN 9139:2012. Công trình thủy lợi — Kết cấu bê tông, bê tông cốt thép vùng ven biển — Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, 2012; 15.

sumption of all components of the concrete mixture should be such that the sum of their absolute volumes is 1,000 liters, i.e. 1 m³ [8, 11, 14]:

$$\frac{FA}{\gamma_{FA}} + \frac{BFS}{\gamma_{BFS}} + \frac{RHA}{\gamma_{RHA}} + \frac{NG}{\gamma_{NG}} + \frac{NaOH}{\gamma_{NaOH}} + \frac{Na_2SiO_3}{\gamma_{Na_2SiO_3}} + \frac{S}{\gamma_S} + \frac{SR5000}{\gamma_{SR5000}} + EA = 1.000, \quad (1)$$

where FA, BFS, RHA, NG, NaOH, Na₂SiO₃, S, SR5000 stand for the consumption of fly ash, blast furnace slag, rice husk ash, natural gypsum, NaOH solution, Na₂SiO₃ solution, sand and SR superplasticizer 5000F, kg; γ_{FA} , γ_{BFS} , γ_{RHA} , γ_{NG} , γ_{NaOH} , $\gamma_{Na_2SiO_3}$, γ_S and γ_{SR5000} , are the true densities of fly ash, blast furnace slag, rice husk ash, natural gypsum, NaOH solution, Na₂SiO₃ solution, sand and superplasticizer SR5000F, g/cm³ (Table 6); EA is the volume of entrained air, l.

The initial blend of the raw materials in the concrete mixture (by mass), selected for the design of the composition of the GPC as a result of research and analysis of the literature [10, 12, 21, 22], are provided in Table 7.

The following ratios were selected for the study $\frac{AP}{AMA} = 0.25; 0.30; 0.35; 0.40; 0.45; 0.50; 0.55; 0.60$.

The method of absolute volumes was used, and subsequent correction was made based on the obtained experimental result, the compositions of concrete mixtures were calculated to obtain cement-free GPC with

a compressive strength of up to 60 MPa after the six-hour heat treatment at the temperature of 100 °C. Compositions of the concrete mixtures discussed in this work, are provided in Table 8.

2. Experimental identification of workability and average density of concrete mixtures and GPC

The workability of cement-free concrete mixtures, used to make GPC, was evaluated by measuring the cone flow diameter in mm in accordance with the requirements of ASTM C1611-18⁸ and TCVN 3106:2007¹⁶. Tests were performed with the help of a truncated mini-cone shown in Fig. 4. Two flow diameters were measured in the two mutually perpendicular directions (Fig. 5).

Experimentally obtained workability, average density of concrete mixtures and GPC are presented in Table 9.

The experimentally identified fluidity of concrete mixtures meets the requirements of TCVN 8218:2009¹⁷ standards (Construction of Offshore and Offshore Structures — Technical Requirements) and TCVN 9139:2012¹⁸ (Concrete Structures for Offshore Structures — Technical Requirements).

¹⁶ TCVN 3106:2007. Hỗn hợp bê tông nặng — Phương pháp thử độ sụt. Hanoi, 2010; 10.

¹⁷ TCVN 8218:2009. Bê tông thủy công — Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, 2009; 12.

¹⁸ TCVN 9139:2012. Công trình thủy lợi — Kết cấu bê tông, bê tông cốt thép vùng ven biển — Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, 2012; 15.

Table 6. True density of raw materials used

Raw materials	FA	BFS	RHA	NG	NaOH	Na ₂ SiO ₃	S	SR5000
True density, g/cm ³	2.35	2.92	2.25	2.31	1.63	1.42	2.65	1.15

Table 7. The blend of raw materials in the concrete mixture (by mass)

Ratios	$\frac{FA}{AMA}^{(*)}$	$\frac{BFS}{AMA}$	$\frac{RHA}{AMA}$	$\frac{NG}{AMA}$	$\frac{AP}{AMA}$	$\frac{S}{AMA}$	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$	$\frac{SR5000}{AMA}$	EA
Quantity	0.45	0.3	0.2	0.05	0.25 to 0.6	1.3	2.5	0.005	3 %

Note: ^(*)AMA = FA + BFS + RHA + NG.

Table 8. Compositions of geopolymer concrete mixtures

Compositions	$\frac{AP}{AMA}$	AMA, kg	Mineral additives				Activating solution		S, kg	SR5000, l
			FA, kg	BFS, kg	RHA, kg	NG, kg	NaOH, kg	Na ₂ SiO ₃ , kg		
1	0.25	907	408	272	181	45	65	162	1,179	4.5
2	0.30	879	396	264	176	44	75	188	1,143	4.4
3	0.35	853	384	256	171	43	85	213	1,109	4.3
4	0.40	828	373	249	166	41	95	237	1,077	4.1
5	0.45	805	362	242	161	40	104	259	1,047	4.0
6	0.50	783	352	235	157	39	112	280	1,018	3.9
7	0.55	762	343	229	152	38	120	299	991	3.8
8	0.60	742	334	223	148	37	127	318	965	3.7

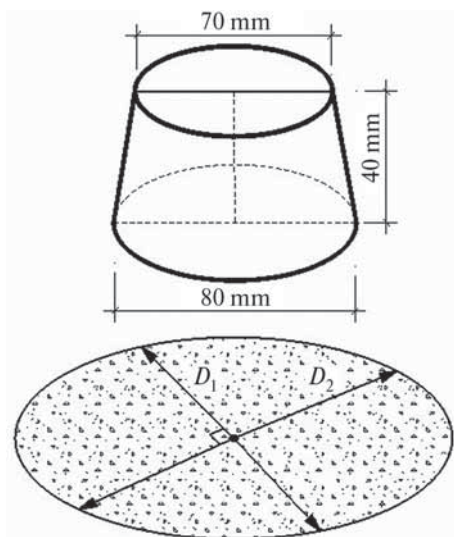


Fig. 4. Truncated mini-cone used to determine the spreading of the concrete mixture



Fig. 5. Determination of workability of geopolymer concrete mixtures according to the cone flow diameter

In the course of the experiments, it was found that the concrete mixtures are homogeneous and do not demonstrate delamination and water separation.

Table 9. Workability and average density of geopolymer concrete mixtures and GPC, water resistance and water absorption of the developed concretes

Compositions	$\frac{AP}{AMA}$	Cone flow diameter, mm	Average density of concrete mixtures, kg/m ³	Average density of GPC, kg/m ³	Impermeability, MPa	Water adsorption, mass. %
1	0.25	180	2,318	2,237	1.0	3.9
2	0.30	190	2,291	2,218	1.0	3.9
3	0.35	190	2,265	2,210	1.8	2.5
4	0.40	200	2,241	2,189	1.2	3.7
5	0.45	210	2,218	2,180	0.8	4.2
6	0.50	220	2,196	2,108	0.8	4.3
7	0.55	230	2,176	2,100	0.6	5.4
8	0.60	230	2,157	2,100	0.4	6.8

Moreover, the experimental results suggest that water resistance goes up and water absorption goes down along with the density growth.

3. Bending compressive and tensile strength of GPC specimens at different hardening ages

Cube-shaped concrete samples, having the dimensions of 150 × 150 × 150 mm were made in accordance with GOST 10180-2012 and TCVN 3118:2012¹⁹. Compressive strength was measured at the age of 28 days, and its bending tensile strength was measured at different ages of hardening, if was also measured after their six-hour heat treatment at the temperature of 100 °C. The results are provided in Tables 10, 11 and in Fig. 6, 7.

Experimental data consolidated in Tables 10, 11 and Figures 6, 7 suggest that the bending compressive and tensile strength of the specimens of GPC concrete de-

pends on the ratio $\frac{AP}{AMA}$. Moreover, against the back-

ground of the established general trends towards the strength reduction accompanied by the increase in the specified ratio, strength values are maximal if the value of this ratio is equal to 0.35. The heat treatment of concrete specimens led to an increase in the 28-day compressive strength by 63–89 %, and an increase in bending tensile strength by 35–66 %.

The compressive strength of the developed concrete at the age of three days of hardening reached 51 to 66 % of their 28-day strength, and by the seventh day of hardening it went up from 65 to 82 %, which indicates a high pace at an early age. The results can be explained by the activating effect of alkaline solution NaOH + Na₂SiO₃, which interacts with aluminate and silicate components of active mineral additives and form a rapidly setting gel polymer system with binding properties [20, 21].

¹⁹ TCVN 9334:2012. Bê tông nặng — Phương pháp xác định cường độ nén bằng súng bật nảy. Hanoi, 2012; 09.

Table 10. Bending compressive and tensile strength of GPC specimens at different ages of normal hardening

Compositions	AP AMA	Compressive strength, MPa					Bending tensile strength, MPa
		3 days	7 days	14 days	28 days	90 days	
1	0.25	20.4	25.2	30.1	34.4	38.7	3.65
2	0.30	24.3	32.6	34.3	36.6	40.6	3.45
3	0.35	25.7	33.4	36.2	37.8	43.3	3.72
4	0.40	23.6	28.2	33.4	35.4	38.9	3.44
5	0.45	18.2	21.3	27.7	28.7	31.2	2.78
6	0.50	14.4	19.8	23.4	25.6	28.3	2.54
7	0.55	12.1	15.7	18.6	20.1	23.1	2.12
8	0.60	12.3	14.2	17.9	19.2	22.7	2.20

Table 11. Bending compressive and tensile strength of GPC samples at different ages after six-hour heat treatment at the temperature of 100 °C

Compositions	AP AMA	Compressive strength, MPa					Bending tensile strength, MPa
		3 days	7 days	14 days	28 days	90 days	
1	0.25	31.4	44.2	54.1	58.3	62.5	4.95
2	0.30	35.5	48.4	56.1	60.1	65.7	5.75
3	0.35	36.8	50.9	57.2	62.4	66.1	6.10
4	0.40	34.4	42.1	52.7	58.2	60.6	5.45
5	0.45	27.1	32.3	43.1	47.1	51.7	4.43
6	0.50	21.3	30.1	37.6	41.3	45.9	3.87
7	0.55	18.7	22.4	29.9	33.1	37.4	3.10
8	0.60	17.8	21.4	28.8	32.2	36.8	2.98

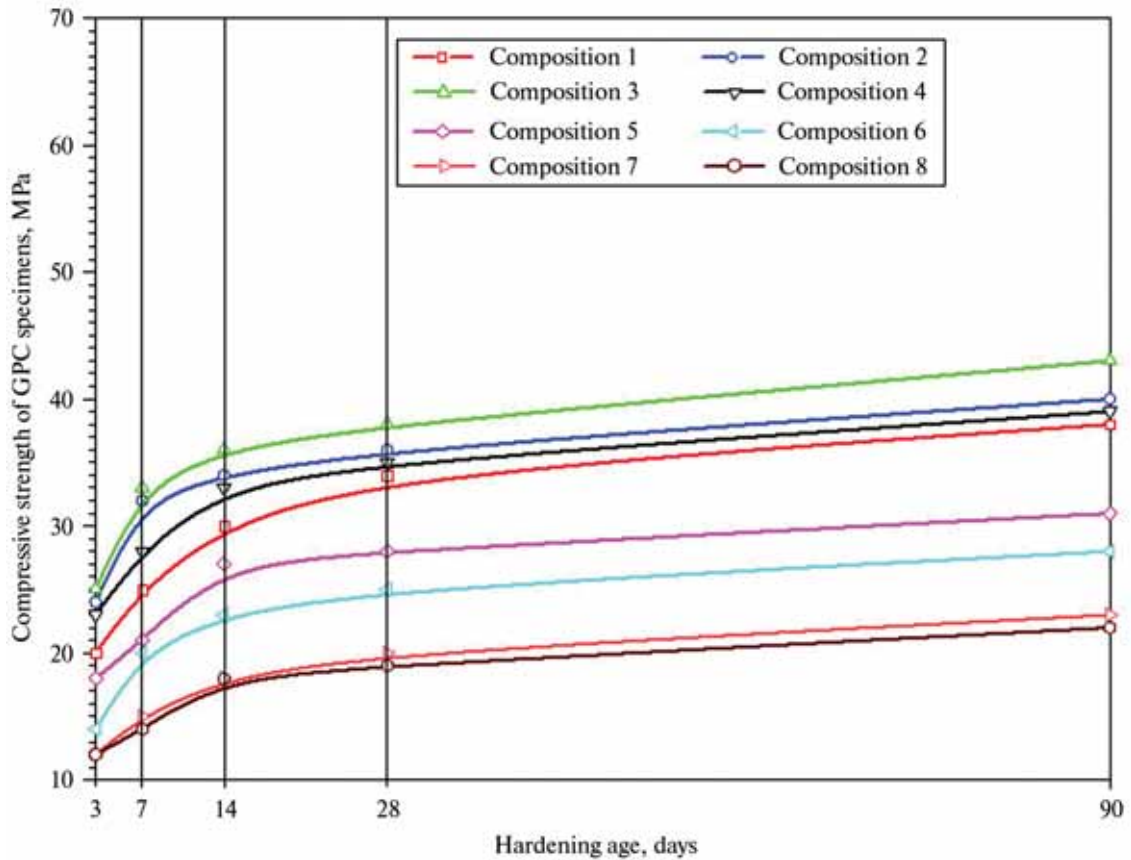


Fig. 6. Dependence of the compressive strength of GPC samples on their composition and age at different ages of normal hardening

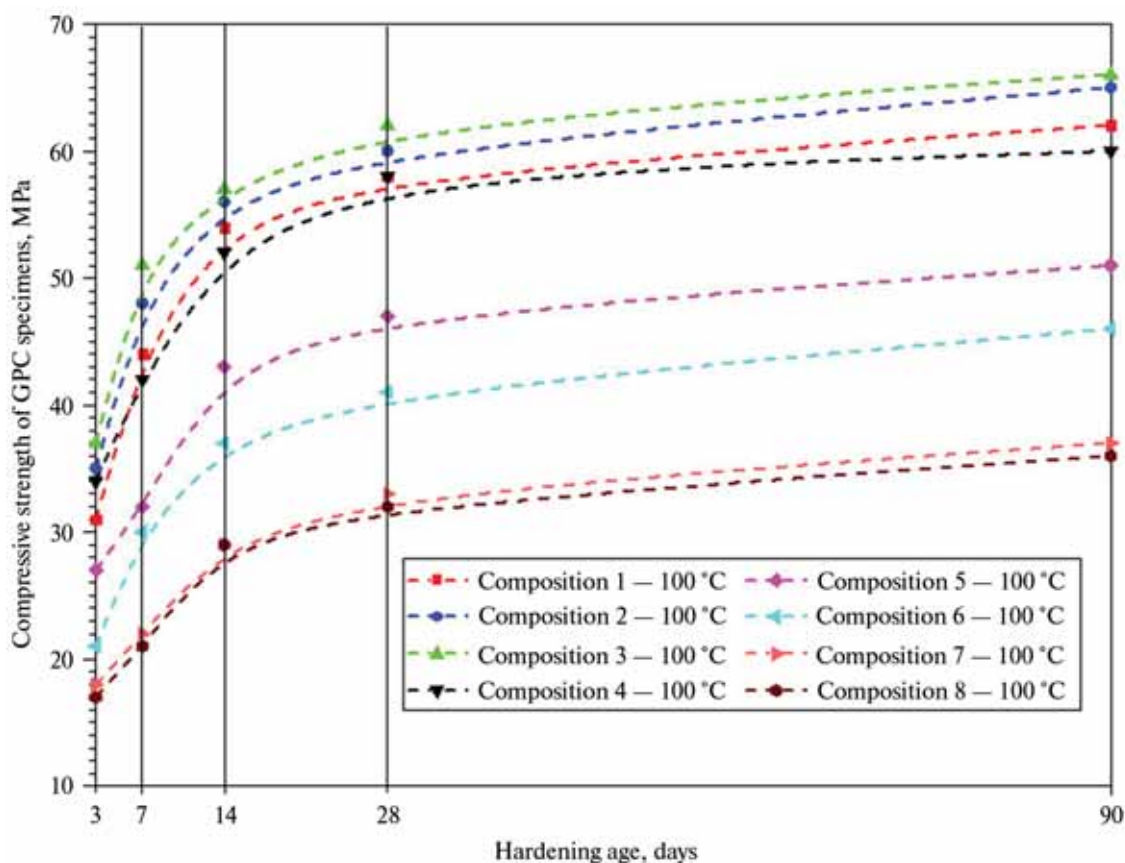


Fig. 7. Dependence of the compressive strength of GPC specimens on their composition and age after the six-hour heat treatment at the temperature of 100 °C

CONCLUSIONS

The following conclusions can be made on the basis of the results of the studies performed by the co-authors.

Local Vietnamese raw materials, including large-tonnage technogenic waste in the form of fuel FA, BFS and RHA, which may contribute to environmental protection, can be used to make GPC that contains a cement-free binder. Its compressive strength is 38 MPa without heat treatment at the age of 28 days of hardening and its bending tensile strength is 3.72 MPa. Its six-hour

heat treatment at 100 °C leads to an increase in the above strength indicators, respectively, to 62 and 6.1 MPa.

A high rate of early development of compressive strength makes GPC a promising building material. In addition, the production of such concrete will contribute to environmental protection by saving natural resources and the usability of large-tonnage technogenic waste.

It is necessary to continue researching the physical and mechanical properties and performance indicators developed by the GPC in order to determine the most rational areas of their application for construction purposes in the hot and humid climate of Vietnam.

REFERENCES

1. Sathawane S.H., Vairagade V.S., Kene K.S. Combine Effect of Rice Husk Ash and Fly Ash on Concrete by 30 % Cement Replacement. *Procedia Engineering*. 2013; 51:35-44. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.009
2. Abdel-Ghani N.T., El-Sayed H.A., El-Habak A.A. Utilization of by-pass cement kiln dust and air-cooled blast-furnace steel slag in the production of some “green” cement products. *HBRC Journal*. 2018; 14(3):408-414. DOI: 10.1016/j.hbrj.2017.11.001
3. Lei Y., Zhang Q., Nielsen C., He K. An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990–2020. *Atmospheric Environment*. 2011; 45(1):147-154. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.09.034
4. Kargin A.A., Malikov I.M. Geopolymer concrete. *Young Russia: Collection of materials of the XI All-Russian scientific-practical conference with international participation*. 2019; 60613. (rus.).
5. Goncharova M.A., Matchenko N.A. Development of geopolymer concrete compositions for structural material. *Scientific Research: From Theory to Practice*. 2015; 2(4):(5):15-18. (rus.).

6. Pham Chi Cuong. The use of waste from the metallurgical industry in Vietnam. *Journal of Science of Vietnam*. 2012; 6(10):52-54.
7. Tang Van Lam, Ngo Xuan Hung, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A., Orekhova A.Yu. et al. The use of ash and slag waste as an additional cementing material. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 8:19-27. DOI: 10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511 (rus.).
8. Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A. Possibility of using ash residues for the production of materials for construction purposes in Vietnam. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017; 6:6-12. DOI: 10.12737/article_5926a059214ca0.89600468 (rus.).
9. Gorbunov G.I., Rasulov O.R. Using Rice Straw to Manufacture Ceramic Bricks. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 11:128-136. (rus.).
10. Lam Van Tang, Hung Xuan Ngo, Dien Vu Kim, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Effect of Complex Organo-Mineral Modifier on the Properties of Corrosion-Resistant Concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:01005. DOI: 10.1051/mateconf/201825101005
11. Si -Huy Ngo, Trong-Phuoc Huynh, Thanh-Tam Thi Le, Ngoc-Hang Thi Mai. Effect of High Loss on Ignition-Fly Ash on Properties of Concrete Fully Immersed in Sulfate Solution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 371:012007. DOI: 10.1088/1757-899X/371/1/012007
12. Tang Van Lam, Bulgakov B., Bazhenov Y., Aleksandrova O., Pham Ngoc Anh. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:032007. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032007
13. Ngo Van Toan. Research on the production of high-strength concrete using fine sand and mineral additives mixed with activated blast-furnace slag and rice husk ash. *Magazine Building Materials — Environment*. 2012; 4:36-45.
14. Viet-Thien-An Van, Rößler C., Danh-Dai Bui, Ludwig H.-M. Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2014; 53:270-278. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015
15. Saad S.A., Nuruddin M.F., Shafiq N., Ali M. Pozzolanic Reaction Mechanism of Rice Husk Ash in Concrete — A Review. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 773-774:1143-1147. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1143
16. Anufriyeva Ye.V. Corrosion-resistant concrete for hydraulic engineering. *Urban Planning Aspects of Sustainable Development of Large Cities*. 2009; 93:537-541. (rus.).
17. Lam Tang Van, Hung Ngo Xuan, Dien Vu Kim, Chuc Nguyen Trong, Bulgakov B.I., Bazhenova O.Yu. et al. Effect of water-binder ratio and complex organic-mineral additive on properties of concrete for marine hydrotechnical constructions. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 3:11-21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21 (rus.).
18. Santhanam M., Cohen M.D., Olek J. Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*. 2006; 36(12):2132-2137. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.09.011
19. Chindaprasirt P., Kanchanda P., Sathonsaowaphak A., Cao H.T. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. *Construction and Building Materials*. 2007; 21(6):1356-1361. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.10.005
20. Thomas R.J., Peethamparan S. Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress-strain behavior. *Construction and Building Materials*. 2015; 93:49-56. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.039
21. Liu Y., Zhu W., Yang E.H. Alkali-activated ground granulated blast-furnace slag incorporating incinerator fly ash as a potential binder. *Construction and Building Materials*. 2016; 112:1005-1012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.153
22. Falikman V.R., Okhotnikova K.Yu. Geopolymeric binders and concrete in modern construction. *International Research Journal*. 2015. 4-1(35):93-97. DOI: 10.18454/IRJ.2227-6017 (rus.).

Received March 9, 2021.

Adopted in revised form on May 24, 2021.

Approved for publication on May 25, 2021.

BIONOTES: **Tang Van Lam** — Candidate of Technical Sciences, Lecturer of the Faculty of Civil Engineering; **Hanoi University of Mining and Geology**; 18 Pho Vien, Duc Thang, Bac Tu Liem, Ha Noi, Vietnam; SPIN-code: 3214-6263, Scopus: 57201185702, ResearcherID: G-2948-2018, ORCID: 0000-0002-4857-835X; lamvantang@gmail.com;

Ngô Xuan Hung — postgraduate student of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; xuanhung1610@mgsu.ru;

Vu Kim Dien — postgraduate student of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3744-3059, Scopus: 57205216458, ResearcherID: AAQ-3813-2020, ORCID: 0000-0002-3367-9043; kimdienxdb@mgsu.ru;

Boris I. Bulgakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5583-1897, Scopus: 57192383523, ResearcherID: H-1884-2018, ORCID: 0000-0002-4737-8524; BulgakovBI@mgsu.ru;

Sofya I. Bazhenova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3439-4221, Scopus: 57194452989, ResearcherID: S-2766-2018, ORCID: 0000-0002-6111-201X; BazhenovaSI@mgsu.ru;

Olga V. Aleksandrova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 790072, Scopus: 57194450051, 57192372475, ORCID: 0000-0003-1791-8515; AleksandrovaOV@mgsu.ru.